

SUMMARY

The cement industry is one of the most energy intensive industries, with energy representing 30 to 40 % of production costs. This gives energy efficiency improvement an important role in reducing production costs. The energy consumption in the US cement industry has been decreased over past decades, although more recently energy consumption seems to have stabilized. Between 1970 and 1999, primary physical energy intensity for cement production dropped 1 %/year from 8.5 to 6.2 GJ/ton. Carbon dioxide emission intensity from fuel combustion and raw meal calcinations dropped 16 %, from 310 kgC/ton to 260 kgC/ton¹⁾. The still relatively high share of wet-process plants suggests the existence of a considerable potential for energy efficiency improvement, when compared to other industrialized countries. Over 40 energy efficient technologies, measures and estimated energy savings have been examined with reference to carbon dioxide savings, investment and operation costs. ◀

ZUSAMMENFASSUNG

Die Zementindustrie ist eine der energieintensivsten Industrien. Mit einem Anteil der Energiekosten von 30 bis 40 % an den Produktionskosten spielen deshalb in dieser Industrie Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz eine wichtige Rolle. Der Energieverbrauch in der US-Zementindustrie konnte während der letzten Jahrzehnte gesenkt werden, obgleich er sich in jüngster Zeit zu stabilisieren scheint. In den Jahren zwischen 1970 und 1999 ging der physische Energieverbrauch bei der Zementherstellung um jährlich 1 % von 8,5 auf 6,2 GJ/t zurück. Die Kohlendioxid-Emissionen aus der Brennstoffverbrennung und Rohmehlcalcination sanken im gleichen Zeitraum um 16 %, von 310 auf 260 kg C/t¹⁾. Der noch relativ hohe Anteil von Anlagen, die nach dem Nassverfahren arbeiten, stellt für die US-Zementindustrie im Vergleich zu anderen Industrieländern ein beträchtliches Potenzial für weitere energetische Verbesserungen dar. Mehr als 40 energieeffiziente Technologien, Maßnahmen und geschätzte Energiesparmöglichkeiten werden mit Hinweisen zur Senkung von Kohlendioxid-Emissionen, Investitions- und Betriebskosten beschrieben. ◀

Published in: *Cement International* Volume 1, No.2 pp.72-87

1) Carbon dioxide emissions are expressed in their metric carbon equivalent. To obtain carbon dioxide emissions expressed in full molecular weight it is necessary to multiply by 44/12.

*) Part 1 appeared in CEMENT INTERNATIONAL 2 (2003) No. 1, pp. 30-35.

(English text provided by the authors)

1) Kohlendioxid-Emissionen werden in ihrem metrischen Kohlenstoff-Äquivalent ausgedrückt. Um eine Kohlendioxid-Emission im vollen Molekulargewicht darzustellen, ist mit 44/12 zu multiplizieren!

*) Teil 1 ist in CEMENT INTERNATIONAL 2 (2003) Nr. 1, S. 30-35, erschienen.

Improving energy efficiency in the U.S. cement industry*)

Part 2: Measures to improve the energy efficiency

Verbesserung der Energieeffizienz in der US-Zementindustrie*)

Teil 2: Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

4 Energy efficiency technologies and measures for the U.S. cement industry

Several technologies and measures exist that can reduce the energy intensity (i.e. the electricity or fuel consumption per unit of output) of the various process stages of cement production. Table 2 and 3 list the technologies and measures for dry and wet process plants. Not all measures will apply to all plants. Applicability will depend on the current and future situation in individual plants. For example, expansion and large capital projects are likely to be implemented only if the company has about 50 years of remaining limestone reserves onsite. Plants that have a shorter remaining supply are unlikely to implement large capital projects, and would rather focus on minor upgrades and energy management measures.

In the following the discussion will be focussed on a few selected measures to demonstrate the analysis performed for each of the technologies that can be found in a forthcoming more detailed report [3].

4.1 Raw material preparation – high-efficiency classifiers

Today classifiers are used in the raw materials mill and the finish grinding. Standard classifiers have a low separation efficiency, which leads to the recycling of fine particles, leading

4 Energieeffiziente Technologien und Maßnahmen für die US-Zementindustrie

Es gibt zahlreiche Technologien und Maßnahmen, die geeignet sind, den immer noch zu hohen spezifischen Bedarf an elektrischer und thermischer Energie in den verschiedenen Prozessstufen der Zementherstellung zu reduzieren. Die Tabellen 2 und 3 enthalten eine Auflistung von Technologien und Maßnahmen sowohl für Zementwerke nach dem Trocken- als auch nach dem Nassverfahren. Nicht alle genannten Maßnahmen sind dabei auf jedes Werk anwendbar. Die Durchsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung des Energiehaushalts hängt von der momentanen als auch zu erwartenden Situation jedes einzelnen Zementwerks ab. Beispielsweise kann eine Erweiterung und Durchführung von Kapital bindenden Projekten sicherlich nur dann praktisch vertreten werden, wenn das betreffende Zementwerk am Standort über Kalksteinvorräte für mehr als 50 Jahre verfügt. Zementwerke, die derartige Lagerstättenvorräte nicht besitzen, werden sich keine großen Projekte leisten können und ihre Aktivitäten eher auf kleinere Durchsatzsteigerungen und Maßnahmen des Energie-Managements konzentrieren müssen.

Im Folgenden soll die Diskussion auf wenige ausgewählte Maßnahmen fokussiert und auf die für jede der Technolo-

Table 2: Energy efficiency measures in dry process cement plants. The estimated savings and payback periods are averages for indication, based on the average performance of the US cement industry.

Tabelle 2: Energieeffiziente Maßnahmen in Zementwerken nach dem Trockenverfahren. (Die geschätzten Einsparungen und Rückflussdauern sind Mittelwerte, basierend auf dem durchschnittlichen Leistungsvermögen der US-Zementindustrie)

Energy Efficiency Measures Energieeffiziente Maßnahmen	Specific Fuel Savings Spez. Brennstoffeinsparungen [GJ/ton cement]	Specific Electricity Savings Spez. elektr. Energie einsparungen [kWh/ton cement]	Estimated Payback Period (1) Geschätzte Rückflussdauer (1) [a]
Raw Materials Preparation Rohmaterialaufbereitung			
Efficient Transport System Effiziente Transportsysteme	-	3.5	> 10 (1)
Raw Meal Blending Rohmehlvergleichmäßigung	-	1.7 to/bis 4.3	N/A (1)
Process Control Vertical Mill Prozesskontrolle Vertikal-Rollenmühle	-	0.9 to/bis 1.1	1
High-Efficiency Roller Mill Hochdruck-Rollenmühle	-	11.2 to/bis 13.1	> 10 (1)
High-Efficiency Classifiers Hochleistungssichter	-	4.7 to/bis 6.4	> 10 (1)
Fuel Preparation Roller Mills Brennstoffmahlung in der Vertikal-Rollenmühle	-	0.8 to/bis 1.2	N/A (1)
Clinker Making Klinkererzeugung			
Energy Management & Control Systems Energie-Management und Kontrollsysteme	0.12 to/bis 0.25	1.3 to/bis 2.9	1 to/bis 3
Seal Replacement Dichtungswechsel	0.02	-	< 1
Combustion System Improvement Verbesserung des Verbrennungssystems	0.12 to/bis 0.45	-	2-3

Continuation of table 2/Fortsetzung von Tabelle 2

Energy Efficiency Measures Energieeffiziente Maßnahmen	Specific Fuel Savings Spez. Brennstoffeinsparungen (GJ/ton-cement)	Specific Electricity Savings Spez. Elektr. Energie- einsparungen (kWh/ton cement)	Estimated Payback Period (1) Geschätzte Rückflussdauer (1) (a)
Shell Heat Loss Reduction Reduzierung Wärmeverluste Ofenmantel	0.10 to/bis 0.35	-	1
Indirect Combustion Indirekte Verbrennung	0.14 to/bis 0.21	-	N/A
Optimize Grate Cooler Optimierung Rostkühler	0.06 to/bis 0.14	-2.0	1 to/bis 2
Conversion to Grate Cooler Austausch durch Rostkühler	0.27	-2.6	1 to/bis 2
Heat Recovery for Power Generation Wärmerückgewinnung für Stromerzeugung	-	19.8	3
Low-pressure Drop Suspension Preheaters Vorwärmer mit niedrigen Druckverlusten	-	0.5 to/bis 3.9	> 10 (1)
Addition of Precalciner or Upgrade Einbau eines Calcinerators o. Durchsatzsteigerung	0.14 to/bis 0.63	-	5 (1)
Conversion of Long Dry Kiln to Preheater Umrüstung langer Trockenöfen auf Vorwärmeröfen	0.42 to/bis 0.85	Increase	> 10 (1)
Conversion of Long Dry Kiln to Precalciner Umrüstung langer Trockenöfen mit Vorwärmer und Calcinator	0.64 to/bis 1.30	Increase	> 10 (1)
Efficient Mill Drives Effiziente Mühlenantriebe	-	0.9 to/bis 3.5	1
Use of Secondary Fuels Einsatz von Sekundärbrennstoffen	> 0.6	-	1
Finish Grinding Zementmahlung			
Energy Management & Process Control Energiemanagement und Prozeßsteuerung	-	1.8	< 1
Improved Grinding Media in Ball Mills Verbesserte Mahlkörper in Kugelmühlen	-	2.0	8 (1)
High Compression Roller Mill Hochdruck-Rollenmühle	-	8 to/bis 27	> 10 (1)
High-Efficiency Classifiers Hochleistungssichter	-	1.9 to/bis 6.6	> 10 (1)
Plant Wide Measures Werkswerte Maßnahmen			
Preventative Maintenance Vorbeugende Instandhaltung	0.04	0 to/bis 5.5	< 1
High Efficiency Motors Hochleistungsmotoren	-	0 to/bis 5.5	< 1
Adjustable Speed Drives Drehzahlregelbare Antriebe	-	6.1 to/bis 7.7	2-3
Optimization of Compressed Air Systems Druckluftoptimierung	-	0 to/bis 2.2	< 3
Efficient Lighting Effiziente Beleuchtung	-	0 to/bis 0.6	N/A
Product Changes Produktveränderungen			
Blended Cements Mischzemente	1.41	-16	< 1
Limestone Portland Cement Portlandkalksteinzement	0.35	3.3	< 1
Use of Steel Slag in Clinker (CemStar) Hüttensand als Rohmaterialkomponente (CemStar)	0.19	-	< 2
Low Alkali Cement NA-Zemente	0.19 to/bis 0.47	N/A	Immediate
Reduced Fineness of Cement for Selected Uses Reduzierte Feinheit für Zemente mit ausgewählten Anwendungen	-	0 to/bis 15	Immediate

(1) Payback periods are calculated on the basis of energy savings alone. In reality this investment may be driven by other considerations than energy efficiency (e.g. productivity, product quality), and will happen as part of the normal business cycle or expansion project. Under these conditions the measure will lower payback period depending on plant-specific conditions.

(1) Die Rückflussdauern sind allein auf der Grundlage der Energieeinsparungen ermittelt worden. In Wirklichkeit werden die Investitionen auch durch die Produktivität, Produktqualität usw. bestimmt. Unter diesen Bedingungen wird die Realisierung einer Maßnahme in Abhängigkeit vom Standort eine kürzere Rückflussdauer zu erwarten haben.

to extra power use in the grinding mill. Various concepts of high-efficiency classifiers have been developed [4,5]. In high-efficiency classifiers, the material is sharper separated, thus reducing overgrinding. Electricity savings through implementing high-efficiency classifiers are estimated at 8% of the specific electricity use [4].

All vertical roller mills have a built-in classifier. In 1990, Tilbury Cement (Delta, BC, Canada) modified a vertical roller mill with a high-efficiency classifier increasing throughput and decreasing electricity use [6]. Case studies have shown a reduction of 3 to 4 kWh/ton raw material [5, 6]. The more steeper size distribution of the raw meal may lead to fuel savings in the kiln and improved clinker quality as well.

4.2 Fuel preparation in vertical roller mills

Vertical roller mills, like those used for cement and raw material grinding, are generally more efficient than conventional tube mills. They can be used to grind raw materials and coal interchangeably, although coal-grinding equipment needs special protection against explosions. Vertical roller mills have been developed for coal grinding, and are used by over 100 plants around the world [8]. Electricity consumption of a vertical roller mill is estimated at 18 to 20 kWh/ton coal [8]. The investment costs for a roller mill are typically higher than that of a tube mill, but the operation costs are also lower; roughly 20% lower than a tube mill [8]. Other advantages of a vertical roller mill are that it is able to handle larger sizes of coal (no pre-crushing needed), and to handle coal types with a higher humidity. Tube mills are preferred for more abrasive coal types. Penetration of roller mills is still relatively low in the

gien durchgeführten Analysen hingewiesen werden, die in detaillierten Berichten [3] demnächst veröffentlicht werden.

4.1 Hochleistungssichter für die Rohmehlerzeugung

Sowohl bei der Rohmehlerzeugung als auch bei der Zementmahlung werden heute Sichter eingesetzt. Standardsichter besitzen eine niedrige Trennschärfe, was zu erhöhten Materialkreisläufen führt und mit einer Erhöhung des spezifischen Energieaufwands der Mühle verbunden ist. Deshalb wurden in den letzten Jahren verschiedene Konzepte von Hochleistungssichtern entwickelt [4, 5]. Hochleistungssichter zeichnen sich durch ihre hohe Trennschärfe aus und tragen dazu bei, dass Übermahlungen des Mahlguts reduziert werden. Die durch den Einsatz von Hochleistungssichtern realisierbaren Einsparungen werden auf ca. 8% des spezifischen elektrischen Gesamtenergieverbrauchs einer Mahlanlage geschätzt [4].

Alle Vertikal-Rollenmühlen sind mit einem innenliegenden Sichter ausgerüstet. Im Jahre 1990 wurde bei Tilbury Cement, Delta, BC, Kanada, eine vorhandene Vertikal-Rollenmühle durch den Einbau eines Hochleistungssichters modernisiert, was bei reduziertem spezifischem Energieverbrauch auch zu einer Durchsatzsteigerung führte [6]. Fallstudien zeigten, dass durch derartige Modifikationen bei der Rohmehlerzeugung der spezifische Energieverbrauch um 3 bis 4 kWh/t gesenkt werden kann [5, 6]. Die bei der Rohmehlerzeugung in einer Vertikal-Rollenmühle erreichbare Korngrößenverteilung kann zu Brennstoffeinsparungen im Klinkerbrennprozess und auch zu einer verbesserten Klinkerqualität führen.

Table 3: Energy efficiency measures in wet process cement plants. The estimated savings and payback periods are averages for indication, based on the average performance of the US cement industry.

Tabelle 3: Energieeffiziente Maßnahmen in Zementwerken nach dem Nassverfahren. (Die geschätzten Einsparungen und Rückflussdauern sind Mittelwerte, basierend auf dem durchschnittlichen Leistungsvermögen der US-Zementindustrie)

Energy Efficiency Measures Energieeffiziente Maßnahmen	Specific Fuel Savings Spez. Brennstoffeinsparungen [GJ/ton cement]	Specific Electricity Savings Spez. Elektr. Energie- einsparungen [kWh/ton cement]	Estimated Payback Period (1) Geschätzte Rückflussdauer(1) [a]
Raw Materials Preparation Rohmehlaufbereitung			
Slurry Blending and Homogenizing Rohschlammvergleichmäßigung und -homogenisierung		0.1 to/bis 0.7	< 3
Wet Mills with Closed Circuit Classifier Naßmühle mit Sichter in geschlossenem Kreislauf		11 to/bis 15	> 10 (1)
High-Efficiency Classifiers Hochleistungssichter		4.7 to/bis 6.4	> 10 (1)
Fuel Preparation: Roller Mills Brennstoffmahlung in der Vertical-Rollenmühle		0.8 to/bis 1.8	N/A (1)
Clinker Making Klinkererzeugung			
Energy Management & Control Systems Energiemanagement und Kontrollsysteme	0.16 to/bis 0.31	1.1 to/bis 2.2	< 2
Seal Replacement Dichtungswechsel	0.02		< 1
Combustion System Improvement Verbesserung des Verbrennungssystems	0.17 to/bis 0.64		2- to/bis 3
Indirect Combustion Indirekte Verbrennung	0.14 to/bis 0.21		N/A

Energy Efficiency Measures Energieeffiziente Maßnahmen	Specific Fuel Savings Spez. Brennstoffeinsparungen (GJ/ton cement)	Specific Electricity Savings Spez. elektr. Energie- einsparungen (kWh/ton cement)	Estimated Payback Period (1) Geschätzte Rückflussdauer (1) (a)
Shell Heat Loss Reduction Reduzierung Wärmeverluste Ofenmantel	0.10 to/bis 0.35	-	1
Optimize Grate Cooler Optimierung Rostkühler	0.06 to/bis 0.15	-	1 to/bis 2
Conversion to Grate Cooler Austausch durch Rostkühler	0.28	-2.7	1 to/bis 2
Conversion to Semi-Dry Process Kiln Umstellung auf Halb-Trockenverfahren	0.90 to/bis 1.40	-4 to/bis -7	> 10 (1)
Conversion to Semi-Wet Process Kiln Umstellung auf Halb-Nassverfahren	1.05	-4	> 10 (1)
Conversion to Dry Precalciner Kiln Umbau auf Trockenverfahren mit Vorwärmer	2.20 to/bis 2.45	-10	> 10 (1)
Efficient Mill Drives Effiziente Mühlenantriebe	-	0.8 to/bis 3.0	1
Use of Secondary Fuels Einsatz von Sekundärbrennstoffen	> 0.60	-	1
Finish Grinding Zementmahlung			
Energy Management & Process Control Energiemanagement und Prozeßsteuerung	-	1.8	< 1
Improved Grinding Media in Ball Mills Verbesserte Mahlkörper in Kugelmühlen	-	2.0	8 (1)
High Compression Roller Mill Hochdruck-Rollenmühle	-	8 to/bis 28	> 10 (1)
High-Efficiency Classifiers Hochleistungssichter	-	1.9 to/bis 6.0	> 10 (1)
Plant Wide Measures Werkswerte Maßnahmen			
Preventative Maintenance Vorbeugende Instandhaltung	0.04	0 to/bis 6	< 1
High Efficiency Motors Hochleistungsmotoren	-	0 to/bis 6	< 1
Adjustable Speed Drives Drehzahlregelbare Antriebe	-	6 to/bis 8	2 to/bis 3
Optimization of Compressed Air Systems Druckluftoptimierung	-	0 to/bis 6	< 3
Efficient Lighting Effiziente Beleuchtung	-	0 to/bis 0.6	N/A
Product Changes Produktveränderungen			
Blended Cements Mischzemente	1.41	-16	< 1
Limestone Portland Cement Portlandkalksteinzement	0.35	3.3	< 1
Use of Steel Slag in Clinker (CemStar) Hüttensand als Rohmaterialkomponente (CemStar)	0.19	-	< 2
Low Alkali Cement NA-Zemente	0.19 to/bis 0.47	N/A	Immediate
Reduced Fineness of Cement for Selected Uses Reduzierte Feinheit für Zemente mit ausgewählten Anwendungen	-	0 to/bis 15	Immediate

(1) Payback periods are calculated on the basis of energy savings alone. In reality this investment may be driven by other considerations than energy efficiency (e.g. productivity, product quality), and will happen as part of the normal business cycle or expansion project. Under these conditions the measure will lower payback period depending on plant-specific conditions.

(1) Die Rückflussdauern sind allein auf der Grundlage der Energieeinsparungen ermittelt worden. In Wirklichkeit werden die Investitionen auch durch die Produktivität, Produktqualität usw. bestimmt. Unter diesen Bedingungen wird die Realisierung einer Maßnahme in Abhängigkeit vom Standort eine kürzere Rückflussdauer zu erwarten haben.

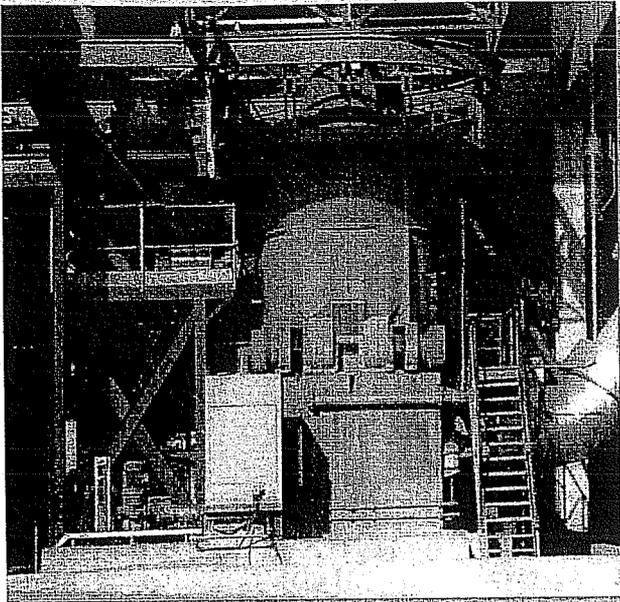


Figure 5: View of a Loesche mill LM 19.20 for drying and grinding of petroleum coke

Bild 5: Blick auf eine Loesche-Mühle LM 19.20 zur Mahltrocknung von Petrolkoks

U.S. Lehigh Portland Cement installed a vertical roller mill for coal grinding in 1999 at the Union Bridge (U.S.) plant. Blue Circle Cement has ordered a vertical roller mill for the new kiln line 5 at the Roberta plant in Calera (U.S.) in 2001. ▶ Figure 5 shows a Loesche mill LM 19.20 D for drying and grinding of petroleum coke.

4.3 Kiln – process control & management systems

Heat from the kiln may be lost through non-optimal process conditions or process management. Automated computer control systems may help to optimize the combustion process and conditions. Improved process control will also help to improve the product quality and grindability. In cement plants across the world, different systems are used, marketed by different manufacturers. Most modern systems use so-called 'fuzzy logic' or expert control, or rule-based control strategies. Expert control systems do not use a modeled process to control process conditions, but try to simulate the best human operator, using information from various stages in the process. One such system, called ABB LINKman, was originally developed in the United Kingdom by Blue Circle Industries and SIRA [9]. The first system was installed at Blue Circle's Hope Works (United Kingdom) in 1985, which resulted in a fuel consumption reduction of nearly 8% [9]. The LINKman system has successfully been used in both wet and dry kilns. Modern control systems now find wider application and can be found in many European plants. Developers also market 'fuzzy logic' control systems, e.g. F.L. Smidth (Denmark), Polysius (Germany) and Mitsui Mining (Japan). All report typical energy savings of 3 to 8%, while improving productivity and availability. Polysius reports typical savings of 2.5 to 5%, with similar increased throughput and increased refractory life of 25 to 100%. Ash Grove implemented a fuzzy control system at the Durkee (U.S.) plant in 1999. An alternative to expert systems or fuzzy logic is model-predictive control using dynamic models of the processes in the kiln. A model predictive control system was installed at a kiln in South-Africa in 1999, reducing energy needs by 4% and increasing productivity and clinker quality. The payback period of this project is estimated at only 8 months in spite of the very low coal prices in South-Africa [10, 11].

4.2 Brennstoffaufbereitung in Vertikal-Rollenmühlen
Vertikal-Rollenmühlen, heute sowohl für die Rohmaterial- als auch Zementmahlung eingesetzt, sind bekannterweise energetisch wesentlich effizienter als Rohrkugelmühlen. Vertikal-Rollenmühlen können sowohl für die Rohmaterial- als auch Kohlemahlung eingesetzt werden, obgleich bei der Kohlemahlung spezielle Sicherheitsvorkehrungen zur Verhinderung von Explosionen getroffen werden müssen. Vertikal-Rollenmühlen sind für die Kohlemahlung heute bereits in mehr als 100 Zementwerken weltweit anzutreffen [8]. Der spezifische elektrische Energiebedarf für die Kohlemahlung in einer Vertikal-Rollenmühle wird auf 18 bis 20 kWh/t geschätzt [8]. Die Investitionskosten für die Errichtung einer Vertikal-Rollenmühle sind üblicherweise höher als beim Einsatz einer Rohrkugelmühle. Allerdings liegen die Betriebskosten dieser Mühle um ca. 20% niedriger als bei einer Rohrkugelmühle [8]. Darüber hinaus besitzt eine Vertikal-Rollenmühle noch andere Vorteile. Sie ist in der Lage, eine Kohle, die mit größeren Korngrößen und auch höheren Feuchtigkeiten angeliefert wird, ohne Vorzerkleinerung aufzubereiten. Rohrkugelmühlen gehört dort der Vorzug, wo besonders abrasive Kohlesorten aufzubereiten sind. Die Verbreitung von Vertikal-Rollenmühlen in der US-Zementindustrie ist bisher relativ gering geblieben. Lehigh Portland Cement installierte 1999 in seinem Werk in Union Bridge eine Vertikal-Rollenmühle für die Kohlemahlung. Blue Circle Cement hat 2001 für seine neue Ofenlinie 5 im Roberta Werk in Calera eine derartige Mühle in Auftrag gegeben. ▶ Bild 5 zeigt eine Loesche-Mühle LM 19.20 D für die Mahltrocknung von Petrolkoks.

4.3 Ofenprozesskontrolle und Managementsysteme

Beim Ofenbetrieb können durch nicht optimale Bedingungen der Prozessführung und durch mangelhaftes Prozessmanagement hohe Wärme- und Durchsatzverluste verursacht werden. Automatische, computergestützte Systeme können heute wesentlich zur Optimierung des Verbrennungsprozesses beitragen. Verbesserte Prozesskontrolle kann auch die Produktqualität und die Mahlbarkeit des erzeugten Klinkers verbessern helfen. Heute werden überall in der Welt sehr verschiedene Systeme von unterschiedlichen Lieferanten verwendet. Die modernsten Systeme nutzen die so genannte Fuzzi Logic, Expert-Systeme oder vorschriftenbasierte Steuerungsstrategien. Die Expert-Steuerungssysteme verwenden dabei nicht ein Prozessmodell, sondern versuchen das Reaktionsverhalten des menschlichen Bedieners bestmöglich zu simulieren, indem sie die Informationen aus den verschiedenen Stufen des Prozessablaufs verarbeiten. Ein derartiges System stellt das ABB LINKman-System dar, welches ursprünglich bei Blue Circle Industries in England entwickelt wurde [9]. Das erste System dieser Art war im Jahre 1985 im Hope Werk von Blue Circle in England installiert worden und führte zu einer nahezu 8%-igen Senkung des Brennstoffeinsatzes [9]. Das LINKman-System wird erfolgreich sowohl bei den Öfen nach dem Nass- als auch nach dem Trockenverfahren angewandt. Moderne Steuerungssysteme haben inzwischen breite Anwendung in nahezu allen europäischen Zementwerken gefunden. Anbieter von Steuerungssystemen, die auf der Fuzzi Logic basieren, sind auch die Unternehmen F.L. Smidth aus Dänemark, die Polysius AG aus Deutschland und Mitsui Mining aus Japan. Alle diese Anbieter berichten über Energieeinsparungen in der Größenordnung von 3 bis 8% sowie von Produktivitäts- und Verfügbarkeitsverbesserungen. Polysius spricht von Energieeinsparungen in der Größenordnung von 2,5 bis 5% mit ähnlichen Durchsatzsteigerungen sowie von einer Standzeitver-

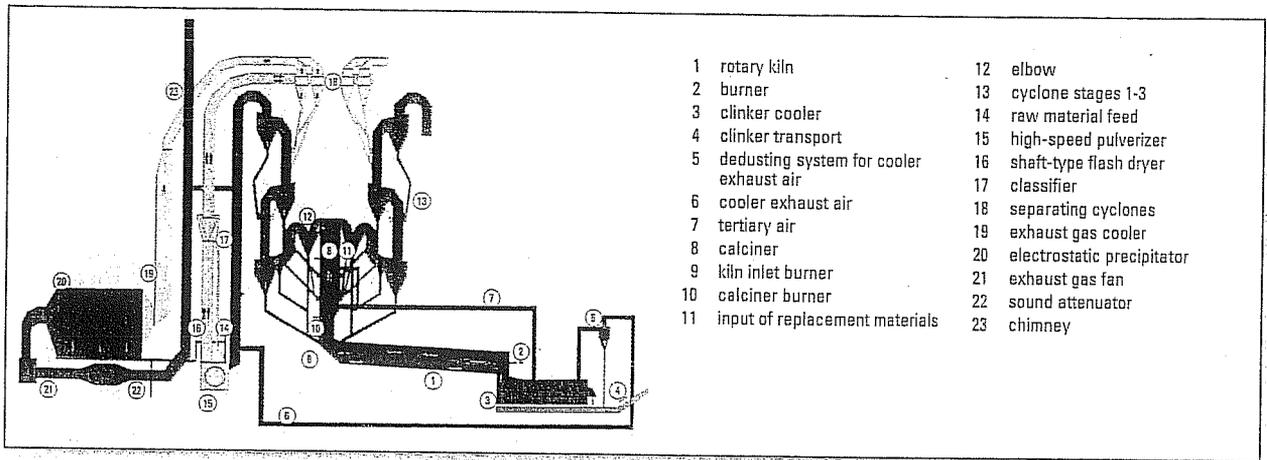


Figure 6: Process flow sheet of Alsens's new kiln line according to the semi-dry process located at Laegerdorf near Hamburg, Germany

Bild 6: Verfahrensschema der neuen, nach dem Halbtrockenverfahren arbeitenden Ofenlinie im Alsen Zementwerk in Lägerdorf bei Hamburg, Deutschland

Additional process control systems include the use of on-line analysers that permit operators to instantaneously determine the chemical composition of raw materials being processed in the plant, thereby allowing for immediate changes in the blend of raw materials. A uniform feed allows for more steady kiln operation, thereby saving ultimately on fuel requirements. Blue Circle's St. Marys plant (Canada) installed an on-line analyser in 1999 in its precalciner kiln, and achieved better process management as well as fuel savings. Also the process control of the clinker cooler can help to improve heat recovery, material throughput, reduction of free lime in the clinker and reduce NO_x emissions [11]. Installing a Process Perfecter® (of Pavilion Technologies Inc.) has increased cooler throughput by 10 %, reduced free lime by 30 % and reduced energy by 5 %, while reducing NO_x emissions by 20 %. The estimated payback period is 1 year.

The economics of advanced process control systems are very good and payback periods of two years or less are achieved [9, 10].

4.4 Kiln - conversion to reciprocating grate cooler

In the U.S. cement industry, no shaft, rotary coolers are used, while some travelling grate coolers are still in use. The grate cooler is the modern variant and is used in almost all modern kilns. The advantages of the grate cooler are its large capacity (allowing large kiln capacities) and efficient heat recovery. Furthermore tertiary heat recovery needed for precalciners is possible.

Modern reciprocating coolers have a higher degree of heat recovery than older variants, increasing heat recovery efficiency between 70 to 80 %. When compared to a planetary cooler, additional heat recovery is possible with grate coolers at an extra power consumption of approximately 2.7 kWh/ton clinker [12]. The savings are estimated to be up to 8 % of the fuel consumption in the kiln. The cost of a cooler conversion is estimated to be between US\$ 0.4 and US \$5/annual ton clinker capacity, depending on the specific technical conditions.

4.5 Wet process conversion to semi-dry process (slurry drier)

In the U.S., a large number of wet process kilns are still in use. In modernized wet kilns, a slurry drier can be added to

längerung der Feuerfestauskleidung von 25 bis 100 %. Ash Grove installierte im Jahre 1999 in seinem Werk in Durkee eine Fuzzi-Steuerung. Eine Alternative zu Expert- oder Fuzzi Logic-Systemen stellt die prädiktive Kontrolle dar, die sich auf dynamische Modelle des Ofenprozesses stützt. Ein prädiktives Kontrollsystem wurde 1999 am Ofen eines südafrikanischen Zementwerks installiert, das Energieeinsparungen um 4 % erbrachte und außerdem zur Produktivitätssteigerung und Verbesserung der Klinkerqualität beitrug. Dieses Projekt refinanzierte sich in nur acht Monaten, obwohl die Kohlepreise in Südafrika schon sehr niedrig sind [10, 11].

Zusätzliche Prozesskontrollsysteme beziehen heute einen on-line Analysator ein, der es dem Anlagenfahrer gestattet, die chemische Zusammensetzung der im Zementwerk hergestellten Rohmehlmischung augenblicklich zu bestimmen, um erforderlichenfalls eine sofortige Veränderung der Rohmaterialmischung zu veranlassen. Eine gleichmäßige Rohmehlzusammensetzung führt zu einem stabileren Ofenbetrieb und in der Folge auch zu möglichen Brennstoffeinsparungen. Das St. Mary Werk von Blue Circle in Kanada installierte im Jahre 1999 an der mit einem Calcinator ausgerüsteten Ofenanlage einen on-line Analysator und konnte durch ein verbessertes Prozessmanagement nachweislich Brennstoffeinsparungen erzielen. Auch die Prozesskontrolle des Klinkerkühlers kann zur Verbesserung der Wärmeregeneration, zur Erhöhung des Durchsatzes und zur Reduzierung des Freikalkgehalts im Klinker sowie der NO_x-Emission beitragen [11]. Die Installation eines so genannten Process Perfectors® von Pavilion Technologies Inc., Austin, Texas, USA, führte zu einer Durchsatzsteigerung von 10 %, zu einer Energieeinsparung von 5 % und neben einer Reduzierung des Freikalkgehalts von 30 % auch zu einer Minderung der NO_x-Emission um 20 %. Der Amortisationszeitraum wird auf ein Jahr geschätzt.

Mit Rückflussdauern von zwei Jahren und darunter ist die Wirtschaftlichkeit moderner Prozessleitsysteme im Allgemeinen schon als sehr gut zu bezeichnen [9, 10].

4.4 Ofenmodernisierung durch Einsatz eines Klinkerrostkühlers

In der US-Zementindustrie befinden sich weder Schlacht- noch Drehrohrkühler im Einsatz, während an einigen Ofen allerdings noch Wanderrostkühler in Betrieb sind. Der Schubrostkühler als modernste Kühlvariante ist bei nahezu allen

the kiln [8]. This reduces energy consumption considerably and increases productivity. This is different from a semi-wet process as a gas drier is used instead of a slurry press filter. The drier can be combined with a hammer mill for a reliable and efficient disagglomeration and drying system [13]. Gas suspension driers are also considered, but no installation has been built yet. Gas suspension driers could increase drying efficiency and potentially reduce fuel consumption in the kiln by up to 1.6 GJ/ton clinker [16]. The first plant that coupled a drier directly to the kiln was put into operation in 1982 in Sutham, England. The first plant in the U.S. to apply the semi-dry process was Lonestar's Greencastle plant (U.S.) almost doubling its production capacity to 1.7 Million tonnes per year. The adding of a slurry drier to an existing wet process kiln requires a substantial capital investment. ▶ Figure 6 shows the process flow sheet of Alsen's new kiln line according to the semi-dry process. The Alsen plant is located at Laegerdorf near Hamburg in Germany.

4.6 Installation or upgrading of a preheater to a preheater/precalciner kiln

An existing preheater kiln may be converted to a multi-stage preheater precalciner kiln by adding a precalciner and, when possible an extra preheater. The addition of a precalciner will generally increase the capacity of the plant, while lowering the specific fuel consumption and reducing NO_x emissions. Using as many features of the existing plant and infrastructure as possible, special precalciners have been developed by various manufacturers to convert existing plants. A well known calciner-system is the so-called Pyroclon® RP from the KHD Humboldt Wedag AG in Germany. Generally, the kiln, foundation and towers are used in the new plant, while cooler and preheaters are replaced. Cooler replacement may be necessary in order to increase the cooling capacity for larger production volumes. The conversion of a plant in Italy, using the existing rotary kiln, led to a capacity increase of 80 to 100 % (from 1 000 to 2 000-2 200 t/d), while reducing specific fuel consumption from 3.6 to 3.1-3.2 GJ/ton clinker, resulting in fuel savings of 11 to 14 % [14]. Fuel savings will depend strongly on the efficiency of the existing kiln and on the new process parameters (e.g. degree of precalcination, cooler efficiency). Staged combustion in a precalciner kiln lowers NO_x emissions.

Older calciners can also be retrofitted for energy efficiency improvement and NO_x emission reduction. Retrofitting the pre-calciner at the Lengerich plant of Dyckerhoff Zement (Germany) in 1998 reduced NO_x emissions by almost 45 % [15]. Similar emission reductions have been found at kilns in Germany, Italy and Switzerland.

Ash Grove's Durkee (U.S.) original 1979 plant installed new preheaters and a precalciner in 1998 (▶ Fig. 7), expanding production from 1 500 to 2 500 t/d [16]. The modification reduced fuel consumption by 0.16 to 0.7 GJ/ton clinker [16], while reducing NO_x emissions.

Capitol Cement (San Antonio, U.S.) replaced an older in-line calciner with a new downdraft calciner to improve production capacity. This was part of a larger project replacing preheaters, installing SO_2 emission reduction equipment, as well as increasing capacity of a vertical roller mill. The new plant was successfully commissioned in 1999. Fuel consumption at Capitol Cement was reduced to 3.4 GJ/ton of clinker [17].

liegen darin, dass er eine hervorragende Wärmerückgewinnung realisiert und gleichermaßen für große bis sehr große Produktionseinheiten gebaut werden kann. Außerdem ist er für Öfen mit Calcinator, die eine Tertiärluftversorgung benötigen, geeignet.

Moderne Schubrostkühler liefern einen höheren Rekuperationsgrad als ältere. Heute werden Rekuperationsgrade zwischen 70 und 80 % erreicht. Verglichen mit einem Satellitenkühler benötigt allerdings der Rostkühler einen um ca. 2,7 kWh/t Kli höheren spezifischen elektrischen Energieaufwand [12]. Beim Einsatz eines modernen Rostkühlers kann mit einer Senkung des spezifischen Wärmebedarfs der Ofenanlage um bis zu 8 % gerechnet werden. Dabei können sich die Kosten für einen Kühleraustausch pro Jahr in Abhängigkeit von den jeweiligen Randbedingungen auf 0,4 bis 5,0 US\$/t Kli belaufen.

4.5 Umstellung von Ofenanlagen nach dem Nassverfahren auf das Halbtrockenverfahren

In der US-Zementindustrie gibt es noch eine große Zahl von Ofenanlagen, die nach dem Nassverfahren arbeiten. Einem Nassofen kann ein Schlammrockner vorgeschaltet werden, in welchem der Schlamm unter Nutzung von Ofenabgas getrocknet wird, bevor er dem Ofen aufgegeben wird [8]. Das Halbtrockenverfahren unterscheidet sich vom so genannten Halbnassverfahren, bei dem der Schlamm in einer Filterpresse teilentwässert wird. Der Schlammrockner kann dabei mit einer Hammermühle kombiniert werden, die sich als zuverlässig erwiesen hat und auch als Desagglomerator ausgezeichnet geeignet ist [13]. Ebenfalls zur Schlammrocknung können Gassuspensionstrockner eingesetzt werden, die allerdings bisher noch nicht gebaut wurden. Gassuspensionstrockner könnten die Effizienz der Trocknung erhöhen und so den spezifischen Wärmeverbrauch des Ofens um bis zu 1,6 GJ/t Kli senken [16]. Die erste Ofenanlage, die mit einem Trockner im direkten Verbund geschaltet wurde, ging im Jahre 1982 in Sutham, England, in Betrieb. Die erste Ofenanlage in den USA, die auf das Halbtrockenverfahren umgestellt wurde, war das Zementwerk Greencastle von Lonestar, wo die Produktion auf heute 1,7 Mio. t fast verdoppelt werden konnte. Die Umstellung eines Nassofens auf das Halbtrockenverfahren ist allerdings mit beträchtlichen Investitionskosten verbunden. ▶ Bild 6 zeigt das verfahrenstechnische Schema der nach dem Halbtrockenverfahren arbeitenden neuen Ofenlinie bei Alsen. Das Zementwerk liegt bei Lägerdorf, in der Nähe von Hamburg, Deutschland.

4.6 Installation oder Leistungssteigerung eines Vorwärmers im Zusammenhang mit dem Einsatz eines Calcinator

Eine bestehende Ofenanlage mit Rohmehlvorwärmer kann mit einem Calcinator ausgerüstet und wenn möglich, noch mit einer zusätzlichen Vorwärmerflut geschaltet werden. Mit der Integration eines Calcinator kann im Allgemeinen der Durchsatz der Ofenanlage wesentlich erhöht und der spezifische Wärmeaufwand sowie die NO_x -Emission können gesenkt werden. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anlagenkonfiguration bei bestehenden Ofenanlagen sowie auch der jeweiligen Infrastruktur wurden zur Umrüstung bestehender Ofenanlagen ganz spezielle Calcinatoren von den verschiedenen Anlagenherstellern entwickelt. Ein bekanntes Calcinator-System ist der Pyroclon®RP von der KHD Humboldt Wedag AG aus Deutschland. Im Allgemeinen werden bei diesen Umrüstungen der Drehofen die Fundamente und die Vorwärmertürme weiter genutzt, während der

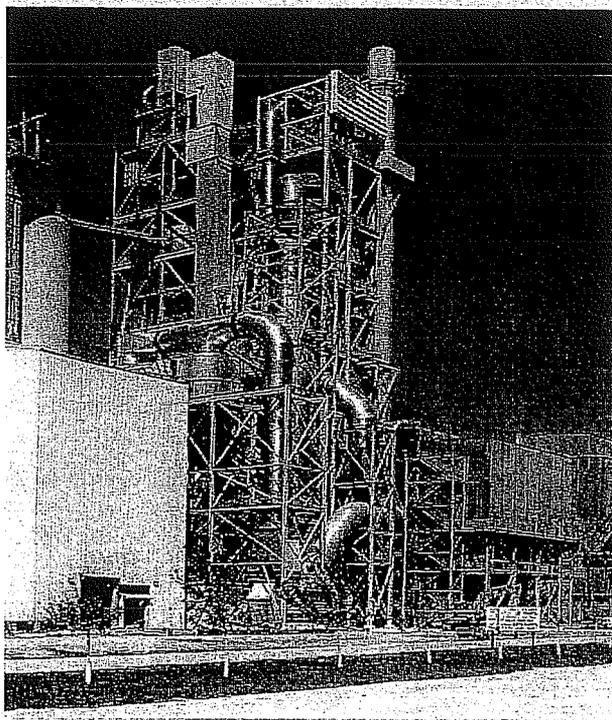


Figure 7: Ash Grove's Durkee plant expanded clinker throughput from 1500 auf 2500 t/d by installation of an extra preheater in connection with a calciner in 1998

Bild 7: In dem von Ash Grove betriebenen US-Zementwerk Durkee wurde 1998 eine vorhandene Ofenlinie mit einem zusätzlichen Vorwärmer in Verbindung mit einem Calcinator umgerüstet, wodurch der Klinkerdurchsatz von 1500 auf 2500 t/d gesteigert werden konnte

4.7 Finish grinding – process control and management

The control systems control the flow in the mill and classifiers, attaining a stable operation and a high quality product. Several systems are marketed by a number of manufacturers. Expert systems have been commercially available since the early 1990's. The Karlstadt plant of Schwenk KG (Germany) implemented an expert system in a finishing mill in 1992, increasing mill throughput and saving energy. The payback is estimated between 1.5 and 2 years in Germany. Magotteaux (Belgium) has marketed a control system for mills since 1998 and has sold six units to plants in Germany (Rohrdorfer Zement), Greece (Heracles General Cement), South Africa (PPC Group) and the United Kingdom (Rugby Group). Experience with a cement mill at the South Ferriby plant of the Rugby Group in the UK showed increased production (+3.3 %) and power savings equal to 3 %, while the standard deviation in fineness went down as well [18]. Polysius markets the PolExpert system and reports energy savings between 2.5 and 10% (typically 8 %), with increased product quality (lower deviation) and production increases of 2.5 to 10 %, after installing control systems in finishing mills [19]. Similar results have been achieved with model predictive control (using neural networks) for a cement ball mill at a South-African cement plant. Pavilion Technologies has developed a new control system using neural networks. Pavilion Technologies reports a 4 to 6 % throughput increase (and corresponding reduction in specific power consumption) for installing a model predictive control system in finish ball mill [11]. Payback periods are typically between 6 and 8 months. Penetration of advanced control systems for cement mills in the U.S. is still relatively low. For example, Polysius has not sold any PolExpert systems in the U.S. despite sales world-wide [19].

Klinkerkühler und die Vorwärmerstufen ausgetauscht werden. Der Austausch des Kühlers ist erforderlich, um für den vergrößerten Klinkerdurchsatz die höhere Wärmeaustauschkapazität bereit zu stellen. Die Umrüstung einer Ofenanlage in Italien unter Weiterverwendung des vorhandenen Drehofens führte zu einer Durchsatzsteigerung von 80 bis 100%, d.h. der Klinkerdurchsatz der vorhandenen Anlage von 1000 t/d wurde durch die Umrüstung auf 2000 bis 2200 t/d gesteigert. Gleichzeitig konnte der spezifische Wärmeverbrauch von 3,6 auf 3,1 bis 3,2 GJ/t Kli, d.h. um 11 bis 14 % gesenkt werden [14]. Die erreichbaren Brennstoffeinsparungen hängen in starkem Maße von der Effizienz der vorhandenen Ofenanlage, von der Stufigkeit des Vorwärmers und dem Abscheidungsgrad der Zyklone, von der Konfiguration des Calcinator und dem Rekuperationsgrad des Klinkerkühlers ab. Mit Hilfe einer gestuften Verbrennung im Calcinator kann dabei auch zielgerichtet die NO_x -Emission gesenkt werden.

Die Errichtung einer großen modernen Ofenlinie mit Calcinator als Ersatz für mehrere kleine Öfen im Werk Lengerich der Dyckerhoff Zement GmbH in Deutschland im Jahre 1998 führte zu einer Senkung der NO_x -Emissionen um fast 45 % [15]. Emissionssenkungen in ähnlicher Größenordnung wurden auch in anderen deutschen Zementwerken, aber auch in der Schweiz und in Italien, erreicht.

Im Zementwerk Durkee von Ash Grove Cement, Oregon, USA, wurde im Jahre 1998 eine 1979 nach dem Trockenverfahren errichtete Ofenlinie mit einem zusätzlichen Vorwärmer in Verbindung mit einem Calcinator umgerüstet (Bild 7), wodurch der Klinkerdurchsatz der Ofenanlage von 1500 auf 2500 t/d gesteigert werden konnte [16]. Durch die Umrüstung konnte der spezifische Wärmeaufwand zwischen 0,1 und 0,7 GJ/t Kli gesenkt werden [16]. Gleichzeitig konnte auch die NO_x -Emission reduziert werden.

Capitol Cement in San Antonio, Texas, USA, tauschte einen vorhandenen in-line Calcinator älterer Bauart gegen einen so genannten downdraft Calcinator aus und konnte durch diese Maßnahme den Klinkerdurchsatz steigern. Dieser Umbau war nur Teil eines größeren Projekts, mit dessen Durchführung auch der Austausch des vorhandenen Vorwärmers, die Installation von Ausrüstungen zur Reduzierung der SO_2 -Emissionen sowie die Durchsatzsteigerung einer vorhandenen Vertikal-Rollenmühle verbunden war. Das modernisierte Werk wurde sehr erfolgreich im Jahre 1999 wieder in Betrieb genommen und erreicht heute einen spezifischen Wärmeverbrauch von 3,4 GJ/t Kli [17].

4.7 Zementmahlung – Prozesskontrolle und Management

Die heute bekannten Systeme steuern den Materialdurchlauf durch Mühle und Sichter und sorgen dadurch sowohl für einen stabilen Betriebsablauf als auch für ein hochqualitatives Produkt. Verschiedene Systeme von einer Anzahl von Herstellern befinden sich auf dem Markt. Die Expert-Systeme sind kommerziell seit den frühen 1990er-Jahren verfügbar. Bereits im Jahr 1992 wurde im Werk Karlstadt der Schwenk AG in Deutschland ein Expert-System an einer Zementmühle implementiert, wodurch Durchsatzsteigerungen bei gleichzeitigen Energieeinsparungen erreicht wurden. In Deutschland rechnet man mit einem Amortisationszeitraum von 1,5 bis 2,0 Jahren. Magotteaux, Belgien, vermarktet seit 1998 eine Mühlensteuerung, wovon sechs Einheiten an Zementwerke in Deutschland (Rohrdorfer Zement), nach Griechenland (Heracles, General Cement), Südafrika (PPC-Grup-

4.8 Finish grinding – new mills

The energy efficiency of ball mills for use in finish grinding is very low. Several new mill concepts exist that can significantly reduce power consumption in the finish mill to 22 to 33 kWh/ton, including vertical roller mills and high compression roller mills also used for pre-grinding in combination with ball mills [8, 20]. The Horomill was first demonstrated in Italy in 1993.

In the Horomill a horizontal roller within a cylinder is driven. The centrifugal forces resulting from the movement of the cylinder cause a uniformly distributed layer to be carried on the inside of the cylinder. The Horomill from FCB Cement in France is a compact mill, which can produce a finished product in one step and hence has relatively low capital costs. Grinding portland cement with a specific surface of 3200 cm²/g Blaine consumes approximately 23 kWh/ton and even for pozzolanic cement with 4000 cm²/g Blaine, the specific power consumption may be as low as 28 kWh/ton [21]. After the first demonstration of the Horomill in Italy, this concept is now also applied in plants in Mexico, Germany, Czech Republic and Turkey.

Today, high-compression roller mills are most often used to expand the capacity of existing grinding mills, and are found especially in countries with high electricity costs or with poor power supply [20]. New designs to protect the roller surfaces of high-compression roller mills allow for longer operation times (> 20000 hours). The electricity savings of a new finish grinding mill when replacing a ball mill is estimated at 30 kWh/ton cement [8]. Capital cost estimates for installing a new high-compression roller mill press vary widely in the literature, ranging from low estimates like US\$ 2.5/annual ton cement capacity or US\$ 3.6/annual ton cement capacity to high estimates of US\$ 8.0/annual ton cement capacity [4, 12]. Some new mill concepts may lead to a reduction in operation costs of as much as 30 to 40 % [22]. In 1994 only 8 % of U.S. cement grinding capacity had installed high-compression roller mills. The finish grinding of cement clinker and blastfurnace slag in a vertical roller mill is the last technical standard. Figure 8 shows the wear protection measures with MPS-vertical roller mills of the Gebr. Pfeiffer AG in Kaiserslautern, Germany.

4.9 Overall – preventative maintenance

Preventative maintenance includes training personnel to be attentive to energy consumption and efficiency. Successful programs have been launched in many industries [25]. While many processes in cement production are primarily automated, there are still opportunities, with minimal training, to increase energy savings. Preventative maintenance (e.g. for the kiln refractory) can also increase a plant's utilization ratio, since it has less down time over the long term. The reduction of false air input into the kiln has the potential to save 11 kcal/kg. Lang [24] notes a reduction of up to 5 kWh/ton for various preventative maintenance and process control measures (typically around 3 kWh/ton). Based on similar programs in other industries it can be estimated that annual costs and start up costs for implementing this training are minimal and are paid back in less than one year.

4.10 Product changes – blended cements

The production of blended cements involves the intergrinding or separate grinding of clinker and one or more main constituents (i.e. fly ash, pozzolans, granulated blastfurnace slag) in various proportions. The use of blended cements is a par-

pe) und England (Rugby Gruppe) verkauft wurden. Die Erfahrungen mit einer Zementmühle im Zementwerk South Ferriby der englischen Rugby Gruppe haben zu einer Durchsatzsteigerung von 3,3 % und zu einer Verringerung der Standard-Abweichung bei der Mahlfineinheit geführt [18]. Polysius vermarktet dieses System unter der Bezeichnung PolExpert und berichtet über Energieeinsparungen zwischen 2,5 und 10 %, bzw. in der Regel 8 %, über Verbesserungen der Produktqualität, ausgedrückt durch die Standardabweichung, sowie über Produktionssteigerungen in der Größenordnung von 2,5 bis 10 % [19]. Ähnliche Ergebnisse sollen auch durch die voraussagende, auf neuronalen Netzwerken basierende Steuerungen bei der Zementmahlung in der Rohrkugelmühle in einem Zementwerk Südafrikas erreicht worden sein. Pavilion Technologies hat ein neues Steuerungssystem entwickelt, das auf der Nutzung neuronaler Netzwerke aufbaut und Durchsatzsteigerungen zwischen 4 bis 6 % bei entsprechender Energieeinsparung liefern soll [11]. Für die erforderliche Kapitalrückflussdauer wurden sechs bis acht Monate angegeben. Die Einführung moderner Steuerungssysteme bei der Zementmahlung ist in den USA noch verhältnismäßig wenig fortgeschritten. Im Gegensatz zur weltweiten Vermarktung von PolExpert hat Polysius bisher nicht ein einziges System in den USA verkauft [19].

4.8 Zementmahlung in neuen Mahlsystemen

Die Energieausnutzung bei der Zementmahlung in einer Rohrkugelmühle ist bekannterweise sehr niedrig. Inzwischen gibt es mehrere neue Mühlenkonzepte, bei deren Einsatz der spezifische elektrische Energiebedarf signifikant reduziert werden kann. Durch den Einsatz von Vertikal-Rollenmühlen und Hochdruck-Rollenmühlen, auch als Vormühlen im Verbund mit Rohrkugelmühlen, kann der spezifische elektrische Energiebedarf produktabhängig auf 22 bis 33 kWh/t gesenkt werden [8, 20]. Eine neue Mühle ist auch die Horomill, die erstmalig im Jahre 1993 in einem italienischen Zementwerk den Betrieb aufnahm.

Bei der Horomill läuft in einem mit überkritischer Drehzahl angetriebenen Zylinder eine horizontal gelagerte Rolle. Die Zerkleinerung findet in dem sichelförmigen Spalt zwischen Zylinder und Rolle statt, wobei das an der Zylinderinnenwand infolge Zentrifugalwirkung haftende Material mittels eines Abstreifers der Beanspruchungszone zugeführt wird. Die Horomill von FCB Cement aus Frankreich ist eine Kompaktmühle, die in der Lage ist, einstufig ein Fertigprodukt zu erzeugen. Die Investitionskosten einer Horomill sind relativ niedrig. Bei der Herstellung eines Portlandzements mit einer spezifischen Oberfläche von 3200 cm²/g nach Blaine benötigt die Horomill einen spezifischen elektrischen Energiebedarf von ca. 23 kWh/t. Bei der Herstellung eines Puzzolanzements mit einer spezifischen Oberfläche von 4000 cm²/g nach Blaine liegt der spezifische Energiebedarf bei 28 kWh/t [21]. Nach der Inbetriebnahme der ersten Horomill in Italien wurde dieses Mühlenkonzept inzwischen auch in Zementwerken in Mexiko, Deutschland, Tschechien und in der Türkei eingeführt.

Heute werden Hochdruck-Rollenmühlen am häufigsten dort eingesetzt, wo die Kapazität bestehender Mahlanlagen erhöht werden soll, die Energiekosten besonders hoch sind oder die Energieversorgung noch einen niedrigen Entwicklungsstand besitzt [20]. Neue technische Lösungen sowie Werkstoffkombinationen zum besseren Schutz der Beanspruchungsflächen bei den Rollen von Hochdruck-Rollenmühlen erlauben heute längere Laufzeiten, die fallweise schon 20000 Be-

ticularly attractive efficiency option since the intergrinding of clinker with other main constituents or the separate grinding of the components not only allows for a reduction in the energy used in clinker production, but also corresponds to a reduction in carbon dioxide emissions in calcination as well. Production of blended cements may also stretch the available limestone reserves. Blended cements are very common in Europe, and blastfurnace and pozzolanic cements account for about 12 % of total cement production with portland composite cement accounting for an additional 44 %.

In the U.S., some of the most prevalent blending materials are fly ash and granulated blastfurnace slag. It should be noted, however, that the use of blended cements in the United States is limited by the standards for portland cement composition established by the American Society for Testing and Materials (ASTM). A recent analysis of the U.S. situation cited an existing potential of producing 34 million tons of blended cement in 2000 using both fly ash and blastfurnace slag, or 36 % of U.S. capacity [25]. This analysis was based on estimates of the availability of intergrinding materials and surveying ready-mix companies to estimate feasible market penetration. The blended cement produced would have, on average, a clinker/cement ratio of 65 % or would result in a reduction in clinker production of 9.3 million tons. The reduction in clinker production corresponds to a specific fuel savings of 1.4 GJ/ton. But it is necessary to assume an increase in fuel use of 0.1 GJ/ton for drying of the blastfurnace slags but a corresponding energy savings of 0.2 GJ/ton for reducing the need to use energy to bypass kiln exit gases to remove alkali-rich dust. Savings of 10 to 21 kJ/kg per percent bypass can be assumed [26]. The bypass savings are due to the fact that blended cements offer an additional advantage in that the interground materials also lower alkali-silica reactivity (ASR) thereby allowing a reduction in energy consumption needed to remove the high alkali content kiln dusts. In practice, bypass savings may be minimal to avoid plugging of the preheaters. Electricity consumption however is expected to increase due to the added electricity consumption associated with grinding blastfurnace slag (as other materials are more or less fine enough). An increase in electricity consumption of 16 kWh/ton can be estimated [21].

The costs of applying additives in cement production may vary. Capital costs are limited to extra storage capacity for the additives. However, blastfurnace slag may need to be dried before use in cement production. This can be done in the grinding mill, using exhaust from the kiln, or a supplemental firing. The operational cost savings will depend on the purchase (including transport) costs of the additives³⁾, the increased electricity costs for (finer) grinding, the reduced fuel costs for clinker production and electricity costs for raw material grinding and kiln drives, as well as the reduced handling and mining costs. These costs will vary by location, and would need to be assessed on the basis of individual plants. We assume an investment cost of US\$ 0.7/ton cement capacity, which reflects the cost of new delivery and storage capacity.

4.11 Raw material changes – CemStar®

Texas Industries (Midlothian, U.S.) in 1994 developed a system to use electric arc furnace (EAF) slags of the steel industry as input in the kiln, reducing the use of limestone. EAFs

triebsstunden übersteigen. Die Einsparungen an elektrischer Energie beim Ersatz einer Rohrkugelmühle durch eine Hochdruck-Rollenmühle kann nach Literaturangaben [8] bis zu 30 kWh/t betragen. Die geschätzten Investitionskosten zur Installation einer Hochdruck-Rollenmühle liegen in der Literatur weit auseinander und reichen von jährlich 2,5 bis 3,6 US\$/t Zement bis zu 8,0 US\$/t Zement [4, 12].

Einige neue Mühlenkonzepte können dabei zu einer Senkung der Betriebskosten von 30 bis 40 % führen [22]. Im Jahre 1994 hatten Hochdruck-Rollenmühlen bei der Zementmahlung in der US-Zementindustrie nur einen Anteil von 8 %, bezogen auf die Gesamtmahlkapazität. Die Fertigmahlung sowohl von Zementklinker als auch von Hüttensand in der Vertikal-Rollenmühle entspricht dem letzten Stand der Technik. Bild 8 zeigt die verschleißtechnische Ausstattung einer MPS-Walzenschüsselmühle der Gebr. Pfeiffer AG in Kaiserslautern, Deutschland.

4.9 Vorbeugende Instandhaltung

Um den effizienten Betrieb einer Ausrüstung und ihres Energieverbrauchs aufmerksam beobachten zu können, schließt vorbeugende Instandhaltung auch das Training des Personals mit ein. In zahlreichen Industrien sind dazu inzwischen erfolgreiche Programme gestartet worden [25]. Obwohl viele Prozesse bei der Zementherstellung weitgehend automatisiert ablaufen, bestehen noch eine Reihe von Möglichkeiten, um mit minimalem Schulungsaufwand Energieeinsparungen zu realisieren. Vorbeugende Instandhaltung, z.B. die Feuerfestauskleidung eines Ofens betreffend, kann auch den Auslastungsgrad einer Anlage erhöhen, wenn weniger Stillstände über eine längere Zeitdauer auftreten. Auch die Reduzierung des Falschlufteintritts in den Ofen kann den spezifischen Wärmeverbrauch um bis zu 11 kcal/kg Kili senken. Lang [24] berichtet über eine Reduzierung des spezifischen elektrischen Energiebedarfs in einer Größenordnung von bis zu 5 kWh/t, im Allgemeinen von ca. 3 kWh/t, wenn verschiedene Maßnahmen der vorbeugenden Instandhaltung und der Prozesssteuerung angewendet werden. Basierend auf vergleichbaren Programmen aus anderen Industrien kann abgeschätzt werden, dass die jährlichen Kosten – auch die für die Durchführung von Trainingsprogrammen – minimal sind und sich in weniger als einem Jahr bezahlt machen.

4.10 Produktveränderungen durch Herstellung von Kompositzementen

Kompositzemente können durch gemeinsames Mahlen von Zementklinker mit weiteren Hauptbestandteilen wie z.B. Flugasche, Puzzolane, Hüttensand etc. in unterschiedlichen Mengenverhältnissen hergestellt werden. Eine getrennte Mahlung der Einzelkomponenten und anschließendes Mischen ist ebenfalls möglich. Der Einsatz von Kompositzementen stellt eine besonders attraktive Option zur Energieeinsparung dar, da die gemeinsame Mahlung von Zementklinker mit weiteren Hauptbestandteilen bzw. die getrennte Mahlung der Komponenten nicht nur zu einer allgemeinen Energieeinsparung bei der Klinkerherstellung führt, sondern zugleich auch mit einer Reduzierung der Kohlendioxidemissionen aus der Rohmehlentsäuerung verbunden ist. Außerdem können durch die Herstellung von Kompositzementen auch die verfügbaren Kalksteinressourcen geschont werden. Kompositzemente sind in Europa sehr aktuell geworden. Hütten- und Puzzolan-zemente machen heute ca. 12 % der gesamten Zementproduktion aus, wenn man Portlandkompositzemente hinzunimmt, erhöht sich dieser Prozentsatz auf 44 %.

3) To avoid disclosing proprietary data, the USGS does not report separate value of shipments data for „cement-quality“ fly ash or granulated blastfurnace slag, making it impossible to estimate an average cost of the additives.

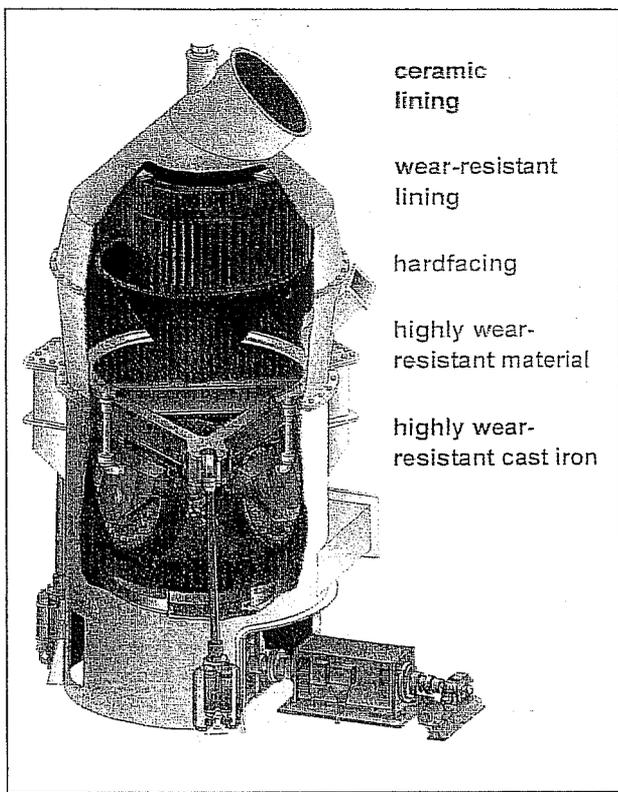


Figure 8: Wear protection measures with MPS-vertical roller mills for finish grinding of cement clinker and blastfurnace slag

Bild 8: Verschleißschutz von MPS-Walzenschüsselmühlen für die Klinker- und Hüttensandmahlung

produce between 55 to 210kg of slag per ton of steel. We estimate the total EAF-slag production at 5.3 million tons, potentially replacing an equal amount of clinker. A limiting factor for the penetration of this technology is the availability of the EAF-slag and its proximity to the recipient cement plant.

The CemStar® process allows replacing 10 to 15% of the clinker by EAF-slags, reducing energy needs for calcination. The advantage of the CemStar®, process is the lack of grinding the slags, but adding them to the kiln in 5cm lumps. Depending on the location of injection it may also save heating energy. Calcination energy is estimated at 1.9GJ/ton clinker. Because the limestone in the slag is already calcinated, it also reduces CO₂ emissions from calcination, while the reduced combustion energy and lower flame temperatures lead to reduced NO_x emissions [27]. For illustrative purposes alone, using a 10% injection of slags would reduce energy consumption by 0.19GJ/ton of clinker, while reducing CO₂ emissions by roughly 11%. Energy savings can be higher in wet kilns due to the reduced evaporation needs. Reductions in NO_x emissions vary by kiln type and may be between 9 and 60%, based on measurements at two kilns [27]. Equipment costs are mainly for material handling and vary between US\$ 200 000 and US\$ 500 000 per installation. Total investments are approximately double the equipment costs. Costs savings consist of increased income from additional clinker and cement produced without increased operation and energy costs, as well as reduced iron ore purchases. The iron content needs to be balanced with other iron sources such as tires and iron ore.

In den USA sind Flugaschen und Hüttensande neben dem Zementklinker die bevorzugten weiteren Hauptbestandteile. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass die Anwendung von Kompositzementen in den USA durch die in den ASTM-Standards vorgeschriebene Zusammensetzung von Portlandzement begrenzt ist. Eine jüngst in den USA durchgeführte Analyse verweist auf ein mögliches Potenzial zur Produktion von 34 Mio. t Kompositzement unter Verwendung von Flugasche und Hüttensand im Jahre 2000, entsprechend einem Anteil von 36% am gesamten Zementaufkommen [25]. Diese Analyse basiert auf einer Abschätzung der verfügbaren Mengen dieser weiteren Hauptbestandteile sowie auf einschlägigen Marktuntersuchungen von Beton herstellenden Unternehmen zur möglichen Marktaufnahme von Kompositzementen. Der produzierte Kompositzement würde im Durchschnitt ein Klinker/Zement-Verhältnis von 65% besitzen und damit eine Senkung der jährlichen US-Klinkerproduktion um 9,3 Mio. t ermöglichen. Mit der Reduzierung des Klinkeraufkommens könnten spezifische Brennstoffeinsparungen von 1,4 GJ/t realisiert werden. Es scheint dabei allerdings notwendig, für die Trocknung des Hüttensands einen Brennstoffbedarf von 0,1 GJ/t zu veranschlagen, wobei andererseits wieder eine Einsparung am spezifischen Wärmebedarf von 0,2 GJ/t durch Reduzierung notwendiger Alkali-Bypässe unterstellt werden kann. Die möglichen Einsparungen können in der Größenordnung von 10 bis 21 kJ/kg Kli, bezogen auf 1% Bypass, angenommen werden [26]. Kompositzemente bieten den zusätzlichen Vorteil, dass weitere Hauptbestandteile die Reaktivität bezüglich der Alkali-Kieselsäure-Reaktion senken können, d.h. bei Einhaltung vorgegebener Zusammensetzung mit NA-Zementen gleichgesetzt werden können, wodurch die Wärmeverluste bei der Entfernung von hochalkaligem Ofenstaub reduziert werden können. In der Praxis reicht dann schon ein minimaler Bypass zur Vermeidung von Ansatzbildungen im Vorwärmer aus. Für den elektrischen Energieverbrauch wird jedoch erwartet, dass er durch den erhöhten spezifischen Bedarf bei der Hüttensandmahlung ansteigt, was bei anderen Hauptbestandteilen nicht der Fall sein muss. Der Mehrbedarf durch den Einsatz von Hüttensand kann auf 16 kWh/t geschätzt werden [21].

Die bei der Verwendung von weiteren Hauptbestandteilen in der Zementherstellung anfallenden Kosten können variieren. Sie werden benötigt für separate Lagerkapazitäten für die einzelnen Hauptbestandteile, wobei Hüttensand einer vorangegangenen Trocknung bedarf, bevor er bei der Zementherstellung verwendet wird. Die Trocknung des Hüttensands kann unter Nutzung von Ofenabgas oder einer Zusatzfeuerung in der Mühle erfolgen, in der er gemahlen wird. Die Betriebskosteneinsparungen hängen vom Einkaufspreis einschließlich der Transportkosten der weiteren Hauptbestandteile ab³⁾, von den erhöhten Stromkosten für ihre (feinere) Mahlung, von den reduzierten Brennstoffkosten für die Klinkerproduktion sowie Stromkosten von Rohmühle und Ofen und auch von den reduzierten Kosten für das Handling und die Gewinnung. Diese Kosten sind standortabhängig und müssen deshalb durch jedes Zementwerk selbst bewertet werden. Die Investitionskosten können auf ca. 0,7 US\$/t Zementkapazität veranschlagt werden, was die Kosten für neue Ausrüstungen und erforderliche Lagerkapazitäten widerspiegelt.

3) Um die Offenlegung von Eigentümerdaten zu vermeiden, berichtet die USGS nicht über separate Versandzahlen für Flugaschen und Hüttensande, die qualitativ zur Zementherstellung geeignet sind, weshalb eine Abschätzung der mittleren Kosten für die weiteren Hauptbestandteile nicht möglich war.

5 Final Remarks

The historic trends for energy efficiency in the U.S. cement industry have been analyzed, and cost-effective energy and carbon dioxide savings identified that can be achieved in the near future. It has been focused on the detailed analysis of energy efficiency technologies and measures to reduce energy use and carbon dioxide emissions for cement production in the U.S. Over 40 energy efficient technologies and measures and estimated energy savings, carbon dioxide savings, investment costs, and operation and maintenance costs for each of the measures have been examined. Substantial potential for energy efficiency improvement exists in the cement industry, and at individual plants. However, part of this potential may only be achieved as part of (natural) stock turnover and expansion of existing facilities. Still, a relatively large potential for improved energy management practices exists.

Acknowledgements

This work was supported by the Climate Protection Partnerships Division, Office of Air and Radiation, U.S. Environmental Protection Agency through the U.S. Department of Energy under Contract No. DE-AC03-76SF00098. ◀

LITERATURE/LITERATUR

- [1] United States Geological Survey, various years, Minerals Yearbook, Washington, D.C., USGS. Located on the World Wide Web at: <http://minerals.er.usgs.gov/minerals>.
- [2] Worrell, E., Price, L.; Martin, N.; Hendriks, C.; Ozawa Meida, L.: Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. Annual Review of Energy and the Environment 26 (2001), pp. 303-329.
- [3] Worrell, E. and Galitsky, C.: Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, forthcoming.
- [4] Holderbank Consulting: Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada. CANMET, Ottawa, Ontario, Canada, 1993.
- [5] Süsssegger, A.: Separator-Report '92. Proc. KHD Symposium '92, Volume 1, Modern Roller Press Technology, KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany, 1993.
- [6] Salzborn, D.; Chin-Fatt, A.: Operational Results of a Vertical Roller Mill Modified with a High Efficiency Classifier, Proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference, Toronto, Ontario, Canada, May 1993.
- [7] Duda, W.H., Cement Data Book, International Process Engineering in the Cement Industry, 3rd edition, Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Germany, 1985.
- [8] Cembureau: Best Available Techniques for the Cement Industry, Brussels, 1997.
- [9] Energy Technology Support Unit: High Level Control of a Cement Kiln. Energy Efficiency Demonstration Scheme, Expanded Project Profile 185, Harwell, United Kingdom, 1988.
- [10] Martin, G.; McGarel, S.: Automated Solution. International Cement Review, February 2001, pp. 66-67.
- [11] Martin, G., Lange, T., Frewin, N.: Next Generation Controllers for Kiln/Cooler and Mill Applications based on Model predictive Control and Neural Networks. Proceedings IEEE-IAS/PCA 2000 Cement Industry Technical Conference, Salt Lake City, UT, May 7th – 12th, 2000.

4.11 Rohmaterialveränderungen durch Anwendung des CemStar®-Prozesses

Texas Industries in Midlothian/USA entwickelte im Jahre 1994 ein System zur Verwertung von Elektroofenschlacke (EOS) aus der Stahlerzeugung als Ersatz für Kalkstein bei der Zementherstellung. Im Stahlwerk fallen pro Tonne Stahl zwischen 55 bis 210kg Schlacken an. Der Gesamtanfall von Schlacken wird auf jährlich 5,3 Mio. t geschätzt, die potenziell eine gleich große Klinkermenge ersetzen könnte. Ein limitierender Faktor beim Einsatz dieser Schlacke ist ihre Verfügbarkeit selbst und die geografische Distanz der Stahlindustrie zum Zementwerk.

Der so genannte CemStar®-Prozess erlaubt den Ersatz von 10 bis 15 % Klinker durch den Einsatz von EOS-Schlacke und reduziert dadurch den hohen spezifischen Wärmeaufwand für die Kalksteinentsäuerung. Ein weiterer Vorteil bei der Anwendung des CemStar®-Prozesses besteht darin, dass auf die Mahlung der Schlacke verzichtet werden kann, da diese in Korngrößen mit ca. 5cm Kantenlänge dem Ofen zugeführt wird. In Abhängigkeit vom Aufgabebort der Schlacke kann man dabei auch Wärmeenergie einsparen. Der Wärmeaufwand für die Durchführung der Kalksteinentsäuerung kann auf 1,9GJ/t Kli geschätzt werden. Da der Kalkstein in der Schlacke bereits entsäuert ist, werden auch die CO₂-Emissionen vermindert. Der verringerte Brennstoffeinsatz und die niedrigeren Flammentemperaturen führen des Weiteren noch zu einer Senkung der NO_x-Emissionen [27]. Wenn man zu reinen Demonstrationszwecken den Eintrag von 10 % Schlacke in das Ofensystem unterstellt, dann könnten der spezifische Wärmeaufwand um ca. 0,19GJ/t Kli und die CO₂-Emissionen um ca. 11 % gesenkt werden. Die Energieeinsparungen fallen wegen des reduzierten Wärmeaufwands für die Wasserverdampfung in Nassöfen noch höher aus. Die Verringerung der NO_x-Emissionen hängt in starkem Maße vom Ofensystem ab und kann auf der Grundlage von Messungen an zwei Öfen zwischen 9 und 60 % variieren [27]. Die erforderlichen Ausrüstungskosten beim Einsatz dieser Schlacken sind hauptsächlich für das Materialhandling einzusetzen und bewegen sich zwischen 200 000 und 500 000 US\$. Die gesamten Investitionskosten sind annähernd doppelt so hoch wie die Ausrüstungskosten. Die Kosteneinsparungen resultieren aus den erhöhten Einnahmen des zusätzlich produzierten Klinkers bzw. Zements – ohne dass dafür erhöhte Betriebs- und Energiekosten aufgebracht werden müssen – sowie aus dem Verzicht, eine Eisenkomponente zukaufen zu müssen. Der Eisengehalt, der mit der Schlacke in das Ofenmehl eingebracht wird, muss mit anderen Eisenkomponenten wie Eisenerzen und den Eisenanteilen, z.B. aus Altreifen, abgestimmt werden.

5 Schlussbemerkungen

Die historischen Trendentwicklungen in der US-Zementindustrie wurden analysiert und kosteneffektive Energieeinsparungen sowie Kohlendioxidminderungen, die in naher Zukunft erreicht werden können; identifiziert. Dabei wurden die Schwerpunkte auf eine detaillierte Analyse von energieeffizienten Technologien sowie die erforderlichen Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Kohlendioxidemissionen gelegt. Über 40 energieeffiziente Technologien und Maßnahmen wurden abgeschätzt, Energieeinsparungen, Emissionssenkungen mit Verweis auf die Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten für jede vorgeschlagenen Maßnahmen, wurden untersucht. In der US-Zementindustrie existiert ein beachtliches Potenzial für energieeffiziente Verbesserungen. Allerdings kann ein Teil die-

- [12] COWIconsult, March Consulting Group and MAIN: Energy Technology in the Cement Industrial Sector, Report prepared for CEC-DG-XVII, Brussels, April 1992.
- [13] Grydgaard, P.: Get out of the Wet, International Cement Review, April 1998.
- [14] Sauli, R.S.: Rotary Kiln Modernization and Clinker Production Increase at Testi Cement Plant of S.A.C.C.I. Spa., Italy. Proc. KHD Symposium '92, Volume 2 "Modern Burning Technology", KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany, 1992.
- [15] Mathée, H.: NOx Reduction with the Prepol MSC Process at the Lengerich Plant of Dyckerhoff Zement GmbH, Polysius Teilt Mit, No. 208 (1999), pp. 53-55.
- [16] Hrizuk, M.J., 1999: Expansion is Key at Durkee, International Cement Review, May 1999.
- [17] Frailey, M.L.; Happ, K.R.: Capitol Cement's Project 2000, Proceedings IEEE 2001 Cement Industry Technical Conference, May 2001.
- [18] Van den Broeck, M.: GO Control Goes 'Multi-Circuit'. International Cement Journal 1 (1999), pp.35-37.
- [19] Goebel, A.: Personal communication with Alexander Goebel, Krupp Polysius, Beckum, Germany, December 20th, 2001.
- [20] Seebach, H.M. von, Neumann, E., Lohnherr L.: State-of-the-Art of Energy-Efficient Grinding Systems, ZKG International 49 (1996) No. 2, pp. 61-67.
- [21] Buzzi, S.: Die Horomill® - Eine Neue Mühle für die Feinzerkleinerung. ZKG International 50 (1997) No. 3, pp. 127-138.
- [22] Sutoh, K., Murata, M.; Hashimoto, S.; Hashimoto, I.; Sawamura, S.; Ueda H.: Gegenwärtiger Stand der Vormahlung von Klinker und Zementrohmaterialien nach dem CKP-System. ZKG International 45 (1992) No. 1, pp. 21-25.
- [23] Caffal, C.: Energy Management in Industry. CADDET Analyses Series 17, Sittard, the Netherlands: CADDET, 1995.
- [24] Lang, Theodor A.: Energy Savings Potential in the Cement Industry and Special Activities of the 'Holderbank' Group. Industrial Energy Efficiency: Policies and Programmes Conference Proceedings (May 26-27, 1994). Paris: International Energy Agency and U.S. Department of Energy.
- [25] Portland Cement Association (PCA): Blended Cement Potential Study. Skokie, IL: Portland Cement Association, 1997.
- [26] Alsop, P.A., Post J.W.: The Cement Plant Operations Handbook, first edition, Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK, 1995.
- [27] Battye, R., S. Wash, J. Lee-Greco: NOx Control Technologies for the Cement Industry, Prepared for US Environmental Protection Agency, Triangle Park, NC, 2000.

ses Potenzials nur im Einklang mit den natürlichen Ressourcen und durch die Erweiterung bestehender Ausrüstungen erschlossen werden. Auch bei der Umsetzung eines verbesserten Energiemanagements besteht noch ein relativ großer Realisierungsbedarf.

Danksagung

Diese Arbeit wurde unterstützt durch die Climate Protection Division, Office of Air and Radiation, U.S. Environmental Protection Agency des U.S. Department of Energy unter der Vertrags-Nr. DE-AC03-76SF00098. ◀

Laborgeräte für...

... Naturstein-Industrie, Asphalt-Technologie, Beton-Technologie, Erd- und Grundbau!

**LABOR
TECHNIK
FULL SERVICE**

messen
prüfen
optimieren



Eckardt + Sohn GmbH
Postfach 14 64
D-59244 Beckum
Telefon (0 25 21) 93 60-0
Telefax (0 25 21) 93 60-20

Bitte fordern Sie unseren Katalog an!



E-Mail: eckardt@labor-technik.de
www.labor-technik.de